„Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile“
Tagungsband zum 1. Berichtskolloquium des SFB 396
Hrsg.: M. Geiger, G. W. Ehrenstein
Meisenbach Bamberg 2000

Modellierungsverfahren zur Regelung und Qualitätsoptimierung verkürzter Prozessketten

A. Weckenmann[1], V. Bettin[2], R. Stöber[3]
Universität Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik
H. Niemann[4], R. Deventer[5]
Universität Erlangen-Nürnberg,
Lehrstuhl für Mustererkennung

Zusammenfassung

Durch die Verkürzung der Entwicklungszeit neuer Produkte müssen zwangsläufig auch die Entwicklungszeiten der Prozessketten zu deren Herstellung reduziert werden. Aus Kostengründen wird dabei gleichzeitig auch eine Reduzierung der benötigten Prozessschritte angestrebt. Dies kann z. B. durch Einsatz aktueller Technologien und durch Zusammenfassen von einstmals mehreren Bearbeitungsschritten zu einem erreicht werden. Durch diese Vorgehensweise wird

---

[1] Prof. Dr.-Ing. Albert Weckenmann:
Ordinarius des Lehrstuhls Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik (QFM),
Nägelsbachstr. 25, 91052 Erlangen
Email: weckenmann@qfm.uni-erlangen.de, URL: http://www.qfm.uni-erlangen.de
[2] Dipl.-Ing. Volker Bettin:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl QFM, Nägelsbachstr. 25, 91052 Erlangen
Email: bettin@qfm.uni-erlangen.de, URL: http://www.qfm.uni-erlangen.de
[3] Dipl.-Ing. Ralf Stöber:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl QFM, Nägelsbachstr. 25, 91052 Erlangen
Email: stoeber@qfm.uni-erlangen.de, URL: http://www.qfm.uni-erlangen.de
[4] Prof. Dr.-Ing. Heinrich Niemann:
Ordinarius des Lehrstuhls für Mustererkennung (LME), Martensstr. 3, 91058 Erlangen
Email: niemann@informatik.uni-erlangen.de, URL: http://www5.informatik.uni-erlangen.de
[5] Dipl.-Inf. Rainer Deventer:
Wissenschaftlicher Mitarbeiter am LME, Martensstr. 3, 91058 Erlangen
Email: deventer@informatik.uni-erlangen.de, URL: http://www5.informaitk.uni-erlangen.de

einerseits die Fertigung optimiert, andererseits steigt aber auch die Komplexität der zu beherrschenden Prozessketten.

Die Teilprojekte A3, C1 und C2 im SFB 396 haben diese Problematik aufgegriffen und arbeiten an Methoden zur Unterstützung bei der erstmaligen Einrichtung neuer Prozessketten bzw. an Verfahren zur Regelung und Qualitätsoptimierung bereits bestehender komplexer Prozessketten. Hierbei werden Methoden der Künstlichen Intelligenz wie Neuronale Netze, Bayesnetze und Wissensbasierte Systeme eingesetzt.

Schlagworte: Qualitätsoptimierung, Regelung, Modellierung, Neuronales Netz, Bayesnetz, Wissensbasiertes System

1 Einleitung und Motivation

Die Verschärfung des internationalen Wettbewerbs in den letzten Jahren führt zu einem erhöhten Kostendruck in der Industrie. Deswegen werden immer kürzere und komplexere Prozessketten entwickelt, die eine Vielzahl von Einflussgrößen aufweisen, deren gegenseitige Abhängigkeiten und Wechselwirkungen auf analytischem Weg meist nicht beschreibbar sind. Hierfür werden leistungsfähige Verfahren benötigt, die es ermöglichen, diese verkürzten Prozessketten innerhalb kurzer Zeit in einen optimalen Betriebspunkt zu fahren und während der Serienproduktion sicher zu regeln. Ein erfolgversprechender Ansatz zur Regelung und Qualitätsoptimierung verkürzter Prozessketten ist die Modellbildung unter Verwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz. Auf diese Weise soll die Möglichkeit geschaffen werden, die komplexen Abhängigkeiten der Parameter verkürzter Prozessketten mit vertretbarem Aufwand in Modelle zu fassen, die für Betrieb und Optimierung der verkürzten Prozesskette verwendet werden können.

Eine Möglichkeit bilden Neuronale Netze, die den Vorteil haben, dass relativ wenig Wissen über die Zusammenhänge notwendig ist, um Modelle zu erstellen. Dies erweist sich vor allem während der Entwicklungsphase von Prozessketten als entscheidender Vorteil, da die Modellbildung ohne großen Aufwand möglich ist. Außerdem besitzen Neuronale Netze die Fähigkeit, auch über die Grenzen der Lerndaten hinaus Vorhersagen zu liefern, da in ihnen die Zusammenhänge zwischen den Parametern gespeichert sind. Ein Nachteil bei der Modellierung mit Neuronalen Netzen stellt allerdings die schwierige Interpretation des Wissens dar, das in den Gewichten verborgen ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Prozessmodellierung stellen Bayesnetze dar. Anschaulich ist ein Bayesnetz ein gerichteter azyklischer Graph, deren Knoten Zufallsvariablen, d. h. in unserem Falle Parameter oder Messwerte, repräsentieren und deren Kanten die Abhängigkeiten zwischen den Variablen widerspiegeln.

Gelernt wird nun die Verbundverteilung der Prozessparameter. Die Vorteile der Modellierung durch Bayesnetze sind die folgenden:

1. Grundlage für Bayesnetze (siehe z. B. [1]) ist die Wahrscheinlichkeitsrechnung, d. h. es existiert einerseits eine sauber formulierte Basis. Andererseits besteht die Möglichkeit, den nichtdeterministischen Zusammenhängen zwischen den Prozessparametern, die durch nicht modellierte Größen entstehen, Rechnung zu tragen.
2. Es existieren Lernalgorithmen, sowohl für die Struktur [2], als auch für die Parameter [3] eines Bayesnetzes. Dadurch kann anhand von den Prozessdaten ein Modell trainiert werden. Vorwissen kann einerseits in die Struktur des Netzes oder in die Initialisierung der Parameter einfließen.
3. Aus der Struktur des Netzes bzw. den Parametern des Bayesnetzes lassen sich wertvolle Informationen bezüglich der Unabhängigkeit von Prozessparametern bzw. über die Stärke des Zusammenhangs erkennen.
4. Bayesnetze erlauben die Rückrechnung von gegebenen Ausgabeparametern, z. B. Qualitätsparametern, auf die Eingabeparameter, die mit maximaler Wahrscheinlichkeit zu dieser Ausgabe geführt haben. Dies kann bei der Ermittlung eines optimalen Prozessfensters genutzt werden.

Als dritte Möglichkeit der Prozesskettenmodellierung werden Wissensbasierte Systeme eingesetzt. In Wissensbasierten Systemen sind die Zusammenhänge in Form von Regeln abgelegt. Dies hat den Vorteil, dass keine scharfe und im mathematischen Sinn exakte Beschreibung erforderlich ist. Vielmehr kann hier das gesamte Wissen, das im Verlauf der Entwicklung und des Betriebes einer Prozesskette gewonnen wurde, gespeichert werden. Besonders Aussagen wie „wenn der Verzug des Spritzgussteils zu groß wird, dann muss der Nachdruck korrigiert werden“ enthalten wichtige Hinweise für die Bediener der Prozesskette. Außerdem können mathematisch beschreibbare Zusammenhänge zwischen Parametern z. B. in Form von Regressionspolynomen in der Wissensbasis gespeichert werden. Allerdings ist der Aufwand für die Erstellung einer Wissensbasis erheblich [4] und das gespeicherte Wissen steht erst während des Betriebs der Prozesskette zur Verfügung.

2 Modellierung von Prozessketten

Die Modellbildung von Prozessketten ist in verschiedenen Phasen der Planung bzw. des Betriebs notwendig. In Bild 1 ist dargestellt, in welchen zeitlichen Phasen die Teilprojekte angesiedelt sind.

In der Planungsphase neuer Prozessketten dominieren in der Regel mathematische Modelle. Da aber bereits in der Planung wesentliche Erkenntnisse für die Konzeption der Prozesskette gewonnen werden, sollte es möglich sein, die in der Planung gewonnenen Erkenntnisse in das initiale Modell einzubeziehen. So-

bald erste Versuchsergebnisse existieren, kann das vorhandene Modell anhand der gewonnenen Daten sukzessive verfeinert werden. Hierbei dürfen die bisherigen Erkenntnisse nicht verloren gehen.

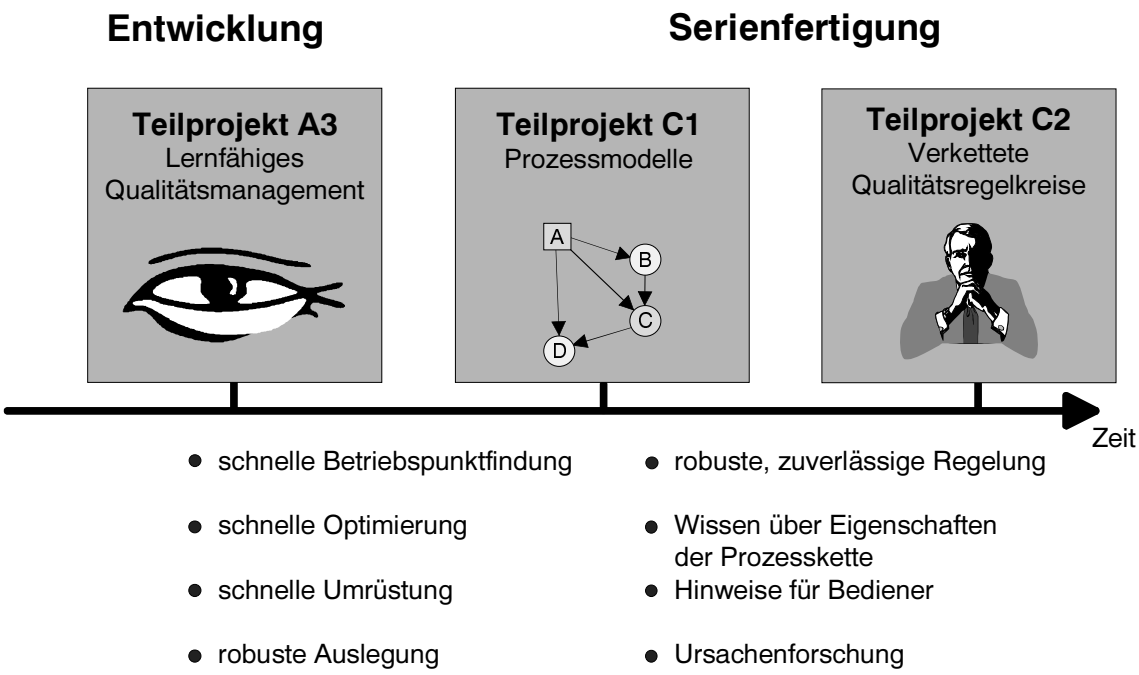

Bild 1: *Wirkungsfelder der Teilprojekte*

Im Idealfall werden Daten aus dem laufenden Betrieb aufgezeichnet und sollen zu einer robusten Auslegung der Strecke führen. Hierfür muss entweder eine direkte Auswertung der Prozessdaten erfolgen, was aufgrund der großen Datenmenge im Allgemeinen nicht möglich ist, oder die Analyse der Daten muss anhand der Modells erfolgen, was die Forderung der guten Interpretierbarkeit nach sich zieht. Die so gewonnenen Erkenntnisse führen dann zu einem besseren Verständnis des Prozesses, das wiederum ein verbessertes Qualitätsmanagement ermöglicht. Hierbei sind beispielsweise folgende Szenarien denkbar:

1. Aufsuchen der für Störungen im Produktionsablauf bzw. für mangelhafte Qualität verantwortlichen Größen. Hierbei können verschiedene Modelle entwickelt werden und anhand des besten Modells die wesentlichen Einflussfaktoren erkannt werden.
2. Aufzeichnen von Istwerten und Qualitätsparametern, die während des laufenden Betriebes bei einer Steuerung anfallen. Eine Analyse zeigt die wesentlichen Zusammenhänge zwischen den Werten auf und kann Hinweise liefern, welche Parameter geregelt werden sollten, um eine bessere Qualität zu erzielen.
3. Anpassen von Parametern bei der Regelung anhand von vorliegenden Prozessdaten.

Bei diesen drei Punkten kann die Analyse offline durchgeführt werden, da keine direkte Einflussnahme auf den laufenden Prozess vorgesehen ist. Falls das Modell direkt zur Regelung herangezogen wird, kommt als wesentliche Forderung noch die Echtzeitfähigkeit hinzu.

3 Arbeiten der einzelnen Teilprojekte

In den folgenden Abschnitten wird der Stand der Arbeiten in den Teilprojekten A3 „Vernetzte, lernfähige Qualitätsmanagementverfahren für Entwicklung und Einsatz verkürzter Prozessketten“, C1 „Sensor- und modellgestützte Optimierung von Prozessketten“ und C2 „Verkettete Qualitätsregelkreise auf der Basis systemgerechter Prozess- und Schnittstellenbewertung“ vorgestellt.

3.1 Vernetzte, lernfähige Qualitätsmanagementverfahren für Entwicklung und Einsatz verkürzter Prozessketten (A3)

Der Trend zu immer kürzeren und komplexeren Prozessketten sowie die Forderung nach kürzeren Entwicklungszeiten bringen insbesondere bei verkürzten Prozessketten eine Reihe von Problemen mit sich. Die große Anzahl von Ziel-, Stell- und Störgrößen macht es schwierig, die Prozesskette einzustellen, da die gegenseitigen Abhängigkeiten der Einflussgrößen analytisch oft nicht bekannt und/oder nicht beschreibbar sind. Im Hinblick auf die Kosten ist es aber unbedingt erforderlich, eine neue oder umgerüstete Prozesskette so schnell wie möglich in einen optimalen Betriebspunkt zu bringen. Gleichzeitig ist sie so auszulegen, dass sie robust gegen Schwankungen der Einflussgrößen ist und nach Anlauf der Serienproduktion möglichst keine Änderungen mehr erforderlich sind. Zum Erreichen dieses Zieles werden im Teilprojekt A3 vernetzte, lernfähige Qualitätsmanagementverfahren eingesetzt, deren wesentlicher Bestandteil die lernfähigen Beobachtermodelle sind.

3.1.1 Erstellen eines Beobachtermodells

Ein Beobachtermodell ist aus Sicht des Teilprojektes ein Modell einer Prozesskette auf der Basis von Methoden der Künstlichen Intelligenz, wie z. B. Neuronalen Netzen und Fuzzy Logic. Im Gegensatz zu herkömmlichen Beobachtern sind die genauen Zusammenhänge zwischen den Ein- und Ausgangsgrößen sowie das zeitliche Verhalten der Prozesskette nicht bekannt, was die Erstellung eines analytischen Modells unmöglich macht. Deshalb muss als erstes eine umfangreiche Systemanalyse der zu modellierenden Prozesskette erstellt werden, um einen Überblick über die Zusammenhänge und möglichen Fehlerquellen des Prozesses zu erhalten. Dabei werden die bekannten Standardmethoden des Qualitätsmanagements, wie zum Beispiel Fehlerbaumanalyse (FBA) [5], Fehler - Möglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) [6], Quality Function Deployment (QFD) [7], Versuchsmethodik (VM) usw., eingesetzt. Diese

Methoden werden im Gegensatz zu der sonst üblichen Praxis vernetzt angewandt, um möglichst schnell und effizient einen Überblick über die Prozesskette zu gewinnen. Damit kann anschließend das Beobachtermodell erstellt werden.

Anhand der vorgenommen Systemanalyse kann die Prozesskette beurteilt und das Vorgehen beim Aufbau des Beobachtermodells festgelegt werden. Zuerst ist zu entscheiden, welche Größen als Eingänge und welche Größen als Ausgänge betrachtet werden. Außerdem ist zu überlegen, welchem Zweck das Beobachtermodell dienen soll: der Modellierung von Parametern oder von zeitabhängigen Kurven. Bei der Parameterabbildung werden die Trainingsdaten als Abtastwerte eines hochdimensionalen Raumes betrachtet, aus denen das Beobachtermodell die Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen und den Ausgangsgrößen lernen soll. Beim Lernen einer Kurve dagegen werden die Messwerte als eine zeitliche Abfolge betrachtet, die das Beobachtermodell lernen soll. In diesem Fall ist es in der Regel erforderlich, mehrere aus Messungen gewonnenen Datensätze derselben Kurve als Trainingsdatenbasis heranzuziehen.

Nach Festlegung von Verwendungszweck und Verbindungen nach außen kann man aufbauend auf die Systemanalyse prüfen, ob die Prozesskette als Ganzes modelliert werden soll oder ob es erforderlich bzw. nützlich ist, sie in Teilprozesse aufzuteilen. Die Vorgehensweise ist in Bild 2 dargestellt.

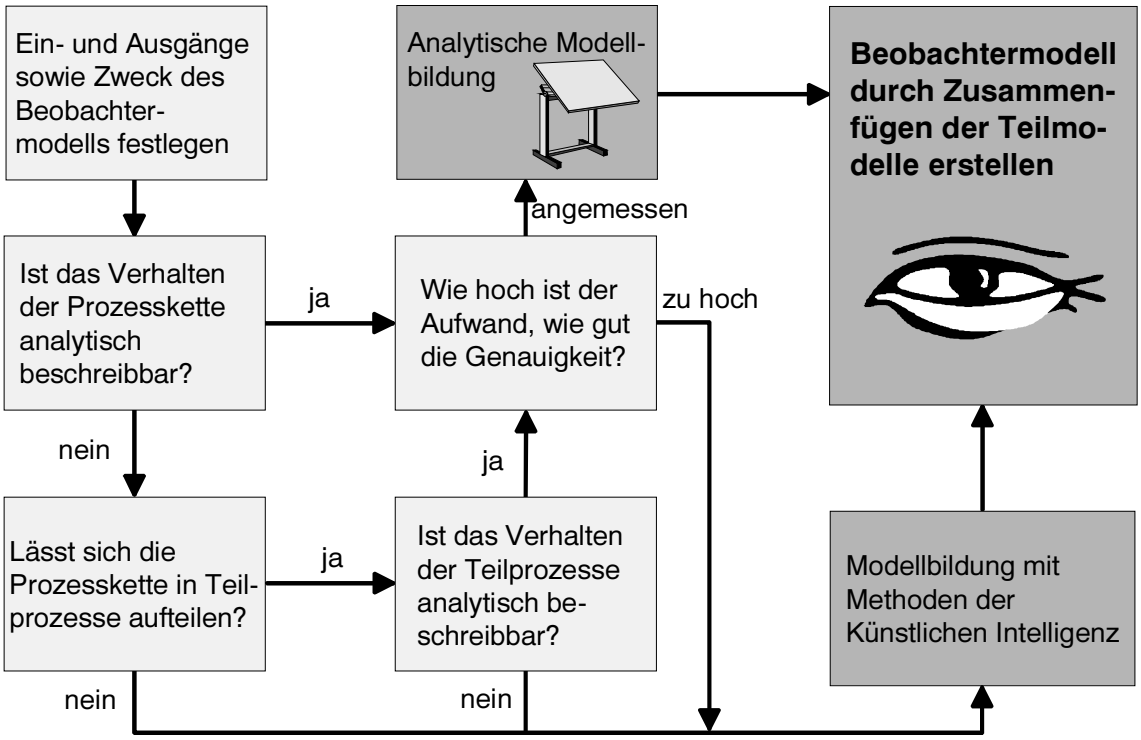

Bild 2: *Entscheidungsregeln bei der Erstellung eines Beobachtermodells*

Dies erweist sich besonders dann als sinnvoll, wenn für einzelne Teile einer Prozesskette bestimmte Modellierungsverfahren besonders gut geeignet sind oder sich bestimmte Teilprozesse einfach modellieren lassen. Dabei kommen Neuronale Netze oder Fuzzy Logic nur an den Stellen zum Einsatz, an denen eine analytische Modellierung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist. Der Aufwand für die Erstellung eines Modells mit Methoden der Künstlichen Intelligenz ist von der Komplexität des modellierten Teilprozesses im Gegensatz zu analytischen Verfahren weitgehend unabhängig.

Wegen der unterschiedlichen Eignung der verschiedenen Verfahren für die Modellierung von Prozessketten und einzelnen Teilprozessen wird in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten C1 und C2 ein Kriterienkatalog erarbeitet, der als Leitfaden für die Anwendung der unterschiedlichen Modellierungsmethoden dienen soll. Darin werden neben den Vor- und Nachteilen der einzelnen Verfahren auch die an der Prozessketten zu untersuchenden Größen angegeben, um möglichst schnell die Entscheidung für das richtige Modellierungsverfahren treffen zu können.

3.1.2 Einsatzbereiche der Beobachtermodelle

Die Beobachtermodelle sind vor allem für den Einsatz während der Entwicklung und Umrüstung von Prozessketten gedacht, um eine schnellere Betriebspunktfindung verkürzter Prozessketten zu ermöglichen und die Zahl der Änderungen nach Serienanlauf zu verringern. Da die zentralen Elemente der Beobachtermodelle Neuronale Netze sind, kann deren Fähigkeit, über die Grenzen der Trainingsdaten hinweg die Zusammenhänge zu beschreiben, dazu verwendet werden, die Parameter der Prozesskette zu optimieren. Dabei kommen genetische Algorithmen zum Einsatz, die die Eingangsgrößen des Beobachtermodells variieren und ausgehend von den besten Individuen jeder Generation versuchen, noch bessere Einstellungen zu finden [8]. Ein ähnliches Verfahren kann auch bei der Umrüstung von Prozessketten angewendet werden. Dabei werden die neuen Eingangsgrößen an das Beobachtermodell angelegt und geprüft, welche Ausgangswerte sich ergeben. Auf diese Weise lassen sich Voreinstellungen für Umrüstungen von Prozessketten finden, sofern die Veränderungen in der Prozesskette nicht fundamental sind, wie zum Beispiel Schweißen anstatt Nieten. Auch hier ist es möglich, genetische Algorithmen anzuwenden, wobei zu beachten ist, dass die Qualität der Vorhersagen mit zunehmender Entfernung vom Trainingsbereich abnimmt. Während der Anwendung der beschriebenen Verfahren zur Optimierung wird das Beobachtermodell selbst nicht verändert.

3.1.3 Anwendung von Beobachtermodellen an Prozessketten

Die Beobachtermodelle wurden bereits an einigen Prozessketten im SFB 396 erfolgreich angewendet. So konnten an der Prozesskette des Teilprojektes B4 (Prozessangepasste Platinen) mit Beobachtermodellen Vorhersagen über das zu

erwartende Ergebnis des Tiefziehprozesses gemacht werden, mit denen eine Verbesserung der Prozesskette und eine Untersuchung verschiedener Einstellvarianten möglich ist, ohne dass dazu eigens aufwendige Versuchsreihen gefahren werden müssen.

Das Lernen von Zeitkurven wurde bereits erfolgreich an der Verfahrensintegration des Teilprojektes C3 eingesetzt. Hier lernten die Beobachtermodelle den zeitlichen Zusammenhang zwischen den Einstellgrößen wie den Niederhalterkräften, und den Ausgangsgrößen wie dem Innendruck. Mit diesen Beobachtermodellen kann man den Verlauf der Ausgangskurven bei geänderten Einstellgrößen, wie z. B. anderen Niederhalterkräften, simulieren und damit den Versuchsaufwand reduzieren.

3.1.4 Ausblick

Die Erstellung der Beobachtermodelle soll auf der Basis des Kriterienkatalogs als Leitfaden für die Anwendungs- und Modellierungsmethoden vereinfacht werden. Dies soll durch Überführung des Kriterienkataloges in ein rechnergestütztes Qualitätsplanungswerkzeug geschehen, das den Anwender beim Aufbau der Beobachtermodelle zielgerichtet unterstützt. Dazu ist insbesondere eine weitere Erforschung und Verbesserung der Systemanalysemethoden erforderlich, um mit möglichst wenig Messungen eine hohe Aussagekraft zu erhalten. Zu denken wäre hier beispielsweise an den Einsatz von Neuronalen Netzen im Bereich der Systemanalyse, um hier schnell Zusammenhänge zu erkennen und so eine gute Basis für die Erstellung der Beobachtermodelle zu erhalten. Insbesondere Methoden wie Quality Function Deployment können mit Unterstützung der Künstlichen Intelligenz noch effizienter eingesetzt werden.

Die entwickelten Beobachtermodelle sollen darüber hinaus in Zukunft auch im Bereich der Regelung eingesetzt werden. Dazu sollen Konzepte entstehen, wie auf Basis eines Beobachtermodells einen Regelkreis betrieben werden kann. Damit soll es neben den Regelungsaufgaben möglich sein, sofort zu erkennen, wenn sich der Prozess aus dem eingestellten Betriebspunkt hinaus bewegt oder langfristige Veränderungen im Prozess durch zunehmende Abweichungen von den Werten der Beobachtermodelle entstehen. Hier bietet sich auch der Einsatz speziell trainierter Neuronaler Netze an, die als Prozesswächter fungieren sollen. Eine solches Konzept der Regelung bedarf einer breiten Wissensbasis über den Prozess und die gesamte Prozesskette, weswegen der Rückgriff auf die Systemanalyse und die Wissensbasis des Teilprojektes C2 unerlässlich ist. Durch die Kombination von Neuronalen Netzen und Wissensbasierten Systemen in einem Konzept eröffnen sich weitere interessante Perspektiven für eine schnellere Einstellung, Optimierung und Regelung von Prozessketten. Dabei kann man für die Erstellung der Beobachtermodelle eine Hilfestellung durch die in der Wissensbasis ablegten Regeln erhalten und andererseits die Wissensbasis durch die während der Regelung und Modellbildung gewonnenen Erkenntnisse ergänzen.

3.2 Sensor- und modellgestützte Optimierung von Prozessketten (C1)

Dieser Abschnitt gliedert sich in einen Abschnitt über Bayesnetze, in dem anhand eines anschaulichen Beispiels die wichtigsten Begriffe eingeführt werden. Im zweiten Abschnitt wird der Weg von den Daten zum fertigen Modell erklärt. Dabei wird aufgezeigt, wie die bereits definierten Modellierungsziele mit Bayesnetzen erreicht werden können.

3.2.1 Bayesnetze

Bayesnetze dienen zum Entwurf von wahrscheinlichkeitstheoretischen Modellen. In diesem Kapitel wird ein stark vereinfachtes Autofahrerszenario entworfen, das dazu dienen soll, die Begriffe diskrete und kontinuierliche Variable sowie die Unabhängigkeit zwischen Variablen zu verdeutlichen.

Am Anfang der Entwicklung von Bayesnetzen wurde mit rein diskreten Variablen gearbeitet, d. h. Variablen, die nur eine endliche Menge von Zuständen annehmen können. Als Beispiel hierfür kann z. B. die Gangschaltung eines Kraftfahrzeuges dienen, das nur die diskreten Zustände erster bis vierter oder fünfter Gang und rückwärts annehmen kann.

Um das Verhalten eines Autofahrers noch weiter zu modellieren kann man noch eine Variable für den momentanen „Aufenthaltsort“ des Autos, z. B. Stadt, Landstraße und Autobahn hinzunehmen. Es zeigt sich, dass der momentan eingelegte Gang zwar nicht mit Sicherheit aus dem Aufenthaltsort abgeleitet werden kann, aber Rückschlüsse durchaus erlaubt sind, da beispielsweise auf der Autobahn hohe Geschwindigkeiten gefahren werden, was die Vermutung nahe legt, dass ein hoher Gang eingelegt wurde, d. h. die Variablen „eingelegter Gang“ und „Aufenthaltsort“ sind nicht unabhängig. Bei der Darstellung eines Bayesnetzes als Graph werden die beiden Variablen durch je einen Knoten repräsentiert, die aufgrund ihrer Abhängigkeit durch eine gerichtete Kante von „Aufenthaltsort“ zu „eingelegter Gang“ verbunden werden.

Fügt man noch eine dritte Variable „Beschleunigungsvermögen“ hinzu, so sind sicherlich „eingelegter Gang“ und „Beschleunigungsvermögen“ voneinander abhängig. D. h. in den Graph wird ein Knoten „Beschleunigungsvermögen“ und eine Kante von „eingelegter Gang“ zu „Beschleunigungsvermögen“ aufgenommen. Die Frage der Abhängigkeit zwischen „Aufenthaltsort“ und „Beschleunigungsvermögen“ lässt sich nicht auf Anhieb beantworten. Ist der eingelegte Gang nicht bekannt, so kann z. B. anhand des Aufenthaltsortes Landstraße via „eingelegtem Gang“ auf ein geringes Beschleunigungsvermögen geschlossen werden. Ist jedoch der eingelegte Gang bekannt, so werden die Variablen Aufenthaltsort und Beschleunigungsvermögen unabhängig, da quasi die Verbindung zwischen Ort und Beschleunigungsvermögen unterbrochen ist.

Falls mit rein diskreten Werten gearbeitet wird, steckt das Wissen eines Bayesnetzes einerseits in der Struktur, die angibt, welche Variablen voneinander

abhängig sind und andererseits in den Verteilungsparametern. Die Stärke der Abhängigkeit wird durch die bedingte Wahrscheinlichkeit einer Variablen in Abhängigkeit einer anderen angegeben.

Im Allgemeinen kann die Beschleunigung eines Fahrzeuges nicht in diskreten Werten angegeben werden. Als Ausweg können die Werte diskretisiert werden, d. h. mehrere kontinuierliche Werte werden zu einem diskreten Wert zusammengefasst. Als Alternative hierzu kann mit hybriden Bayesnetzen gearbeitet werden, die sowohl diskrete als auch kontinuierliche Knoten enthalten. In diesem Fall wird für jede kontinuierliche Zufallsvariable eine Mischung von Normalverteilungen angenommen, wobei die Mittelwerte und Streuungen der einzelnen Verteilungen als Parameter dienen.

3.2.2 Modellierung durch Bayesnetze

In diesem Kapitel wird anhand von Innenhochdruckumformen (IHU) der Modellierungsprozess erläutert, und wie die vorher definierten Ziele durch die Verwendung von Bayesnetzen erfüllt werden.

Die Kernidee von IHU ist, dass zwei Bleche, die durch Niederhalterkräfte aufeinandergedrückt werden, durch IHU-Medium, das zwischen die Bleche gepumpt wird, in eine äußere Form gepresst werden und dadurch ihre endgültige Form erhalten. IHU gliedert sich dabei in die zwei Phasen Vorformen und Kalibrieren. Während des Vorformens wird mit niedrigen Niederhalterkräften gearbeitet, so dass die Bleche in die Form fließen können. Beim Kalibrieren werden die Niederhalterkräfte erhöht, so dass ein weiteres Nachfließen des Bleches unterbunden wird. Außerdem sorgt der erhöhte Druck dafür, dass die Ecken der äußeren Form gut ausgefüllt werden.

Die Daten, die zur Modellierung verwendet werden, stammen aus der Werkstoffprüfung, die aufzeigt, wie viel IHU-Medium zwischen die Bleche gepresst werden kann, bevor ein Bersten erfolgt. Ziel der Modellierung ist der Zusammenhang zwischen dem Volumen V und dem Druck P. Bedingt durch die Daten aus der Werkstoffprüfung muss das Bersten, d. h. eine Unstetigkeit modelliert werden. Außerdem enthält die V-P-Kurve mehrere Nichtlinearitäten.

Folgende Überlegungen führen zu dem gewählten Modell. Sowohl das Volumen V als auch der Druck P sind kontinuierliche Größen und sollen auch dementsprechend modelliert werden. Da die zu modellierende Kurve jedoch Nichtlinearitäten und eine Unstetigkeit aufweist, kann nicht mit einem rein kontinuierlichen Modell, das nur die Modellierung von linearen Zusammenhängen erlaubt, gearbeitet werden. Daher wird auf ein hybrides Modell mit diskreten und kontinuierlichen Knoten zurückgegriffen. Die zugrunde liegende Idee ist dabei die Berechnung einer stückweisen, linearen Approximation. Die entsprechende Stützstelle wird durch einen diskreten Knoten V_d ausgewählt, der durch den Knoten $V_k = V$ getriggert wird. Ein weiterer Knoten wird noch zur Kalkulation des

Quantisierungsfehlers $Qf = V - V_d$ eingefügt. Der Knoten P erhält als Eingabe einerseits die ausgewählte Stützstelle und andererseits die Abweichung $V - V_d$. Dadurch kann der Druck mit $P \approx P(V_d) + P'(V_d)(V - V_d)$ approximiert werden. Damit steht bereits ein initiales Modell. In Bild 3 sind zusätzlich die Gewichte angegeben, die zur Berechnung der stückweisen linearen Approximation verwendet werden können, eingetragen. Eine Erklärung hierfür findet sich in [9]. Weitere Punkte, die wichtig für ein initiales Modell sind, sind unter anderem:

1. Unabhängigkeit der Eingabevariablen,
2. Einfluss der Eingabevariablen auf die Qualitätsparameter.

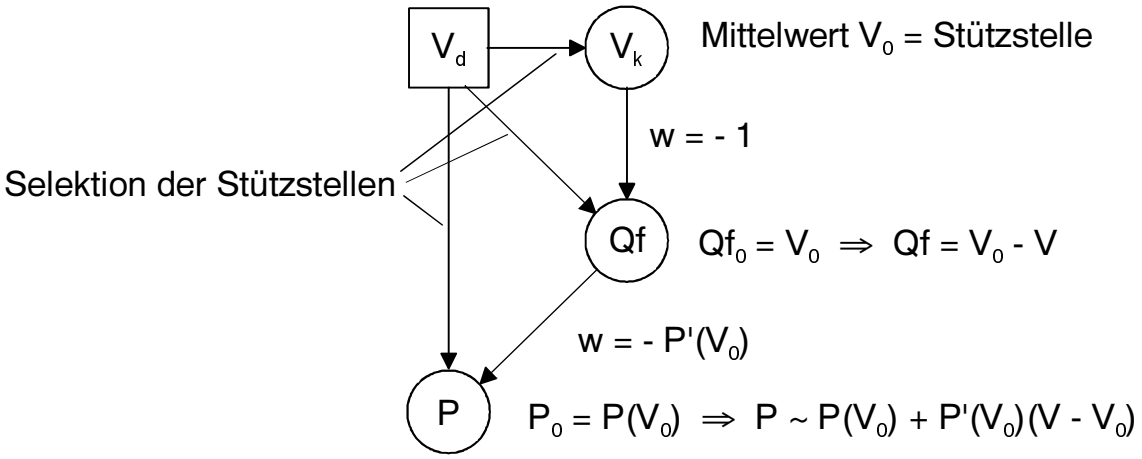

Bild 3: *Modellierung IHU*

Als nächster Schritt folgt eine Verfeinerung des Modells. In unserem Beispiel ist das einerseits das Training der Parameter, z. B. die Anpassung der Stützstellen und der bedingten Wahrscheinlichkeiten. Weitere Möglichkeiten zur Modellverfeinerung, die bei der Modellierung von IHU nicht genutzt wurden sind:

1. Entfernen oder Hinzufügen von Kanten. Dies geschieht durch den Vergleich verschiedener Modelle.
2. Hinzunahme weiterer Messwerte bei der Modellierung.

Als letzter Punkt muss die Interpretierbarkeit des Modells untersucht werden. Wie gut das Modell interpretiert werden kann, hängt im Wesentlichen davon ab, ob die Bedeutung der einzelnen Knoten bekannt ist oder nicht. Folgende Informationen können aus dem Bayesnetz entnommen werden:

1. Unabhängigkeit eines Qualitätsparameters von einer Eingabe bzw. einer Störgröße. Dies lässt sich entweder an einer fehlenden Kante im Modell erkennen, oder daran, dass sich die bedingte Wahrscheinlichkeit einer Größe nur schwach bei Änderung einer anderen Größe ändert.

2. Bei der Verwendung von kontinuierlichen Knoten wird zu jedem Mittelwert eine Streuung angegeben, die als Sicherheit der entsprechenden Aussage gedeutet werden kann.
3. Teilweise kann man den Gewichten zwischen den Knoten eine exakte Bedeutung geben, z. B. im Sinne einer Steigung oder der ersten Ableitung an der Stützstelle.

Das soeben betrachtete Modell kann außerdem noch zur Vorhersage des Berstens verwendet werden. Dies erlaubt es in dem späteren Fertigungsprozess den Druck bis kurz vor dem Bersten zu erhöhen, so dass ein sauberes Kalibrieren ermöglicht wird.

Neben der bisher geschilderten Modellierung von IHU wurde als zweite Referenzprozesskette das Spritzgießen modelliert. Auch hierbei handelt es sich um eine statische Modellierung. Um zu einer Regelung zu kommen müssen noch zwei wesentliche Aspekte berücksichtigt werden:

1. Übertragbarkeit der Ergebnisse auf allgemeine Prozessketten,
2. Berücksichtigung von Rückkopplungen.

3.2.3 Ausblick

Um die Übertragbarkeit auf Prozesse beliebiger Art zu gewährleisten, wird die Modellierbarkeit der aus der Regelungstechnik bekannten Übertragungsglieder, d. h. Proportional-, Differential-, Integral- und Totzeitglied, und deren Verknüpfungsmöglichkeiten untersucht. Dadurch können die wichtigsten Regelstrecken und auch Regler modelliert werden. Mit Ausnahme des Proportionalgliedes hängt dabei die Ausgabe des Übertragungsgliedes von der Historie ab, so dass der Einsatz dynamischer Bayesnetze erforderlich wird.

Um ausgehend von der Modellierung zu einer Regelung zu kommen, bieten sich die drei folgenden Wege an:

1. Modellierung eines PID-Reglers.
2. Direkte Verwendung des Modells, d. h. der Sollwert zum Zeitpunkt t+n und alle bekannten Messwerte werden als Evidenz eingegeben und die wahrscheinlichsten Stellgrößen anhand des Modells berechnet.
3. Ausgehend von den Istwerten können Aktionen, die das dynamische System beeinflussen, definiert werden.

In der dritten Phase des Projektes steht die systematische Optimierung der Struktur im Zentrum der Arbeit.

3.3 Verkettete Qualitätsregelkreise auf der Basis systemgerechter Prozess- und Schnittstellenbewertung (C2)

Die Verkürzung von Prozessketten, z. B. durch Verfahrensintegration, zieht komplexere, gegenüber konventionellen Prozessketten schwieriger zu beherrschende Wirkzusammenhänge nach sich. Damit einher gehen stärkere gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Prozessschritten, die mit den bisher eingesetzten werkerorientierten Verfahren zur isolierten Überwachung und Verbesserung der Qualität von Teilprozessen nicht mehr beherrschbar sind [10]. Hierfür sind neue, in sich geschlossene Qualitätsregelkreisstrategien erforderlich.

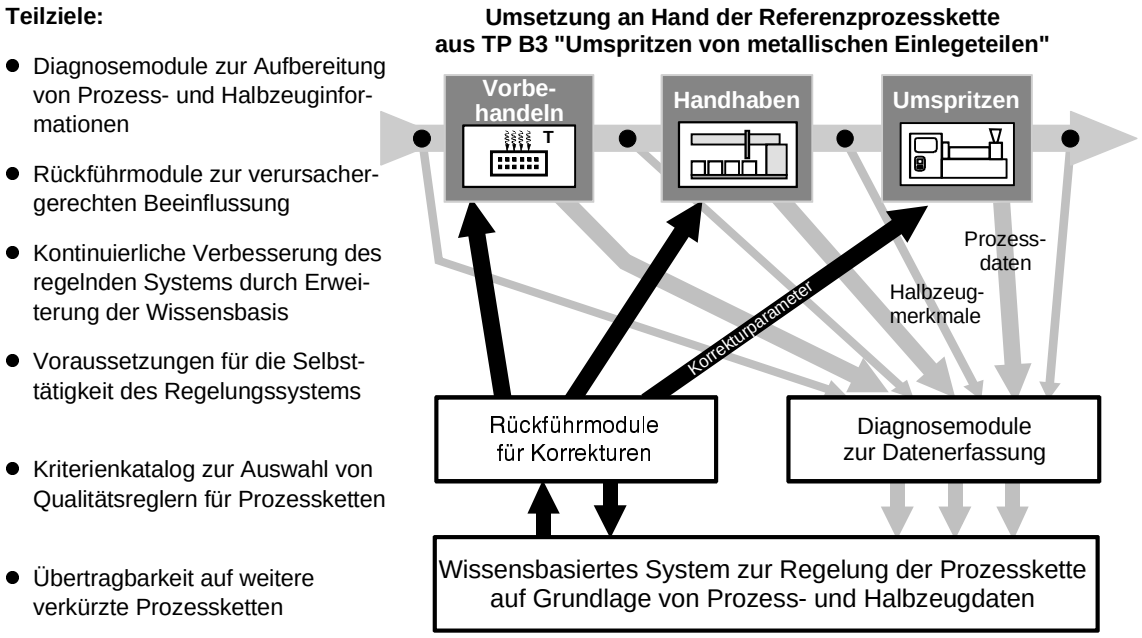

Bild 4: *Zielsetzung des Teilprojektes C2 „Verkettete Qualitätsregelkreise“*

In diesem Teilprojekt werden Regelkreisstrategien erforscht, die in der Lage sind, die intensiven Wechselwirkungen zwischen den Einfluss- und Zielgrößen sowie zwischen den beteiligten Einzelprozessen transparent aufzuzeigen und damit zur Unterstützung bei der Einstellung und Optimierung verkürzter Prozessketten dienen. Hierzu wird ein System verketteter Qualitätsregelkreise erarbeitet, das durch Bewerten von Zustandsinformationen aus Einzelprozessen und Schnittstellen qualitätsbezogene Korrekturparameter berechnet und diese verursachergerecht an die Prozesskette zurückführt (Bild 4).

3.3.1 Umsetzung

Die Informationen über die Zusammenhänge in der Prozesskette zwischen Einstell- und Zielgrößen sowie zwischen den Wechselwirkungen der Teilprozesse untereinander werden in Form von Regeln in einem Wissensbasierten System abgelegt. Für den Aufbau der Wissensbasis ist die genaue Kenntnis dieser

Zusammenhänge zwingend erforderlich. Wissensbasierte System bieten den Vorteil, dass sie situationsgerecht mit dem Benutzer über ein Dialogsystem kommunizieren können und die vom System vorgeschlagenen Lösungen nachvollziehbar sind [11]. Die bisherigen Arbeiten erfolgten anhand der Prozesskette des Teilprojektes B3 „Umspritzen von metallischen Einlegeteilen“.

Zunächst wurden, ähnlich der konventionellen Vorgehensweise, die Teilprozesse Vorwärmen - Handhaben - Umspritzen einzeln untersucht. Dabei wurden die an jedem Einzelprozess beteiligten Einfluss- und Einstellgrößen analysiert und zusätzlich hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Fertigteil, das am Ende der gesamten Prozesskette vorliegt, strukturiert. Aus der Vielzahl der möglichen Qualitätszielgrößen wurde eine exemplarische Auswahl (z. B. Bauteilverzug, Verbundfestigkeit) getroffen und das Verhalten der Prozesskette im Hinblick auf diese Zielgrößen in Versuchsreihen mit wechselnden Werten der Einstellgrößen, die in Voruntersuchungen als signifikant in Bezug auf die ausgewählten Zielgrößen ermittelt wurden, untersucht. Speziell bei dieser Prozesskette wurde berücksichtigt, dass die Fertigteile im Spritzguss erst nach etwa einer Woche ihre endgültigen Eigenschaften aufweisen, da in Abhängigkeit der eingesetzten Kunststoffkomponente Prozesse im Bauteil wie z. B. Nachkristallisationsvorgänge stattfinden.

Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen wurden in ein Wissensbasiertes System eingegeben, das damit nach Eingabe der Einstellwerte zu Voraussagen der Zielgrößen (z. B. Verzug) befähigt wurde. Umgekehrt kann nach Eingabe eines gewünschten Zielwertes und unvollständiger Einstellwerte eine Empfehlung ausgegeben werden, wie die unbekannten, nicht eingegebenen Einstellwerte gewählt werden müssen, damit der angestrebte Zielwert erreicht wird.

3.3.2 Qualitätsregelkreise für Prozessketten

Mit Qualitätsregelkreisen für Prozessketten können nach dem Erkennen von Abweichungen im wesentlichen zwei verschiedene Aktionen ausgelöst werden:

1. Beeinflussung der nachfolgenden Prozessschritte, so dass die erkannte Abweichung und deren Auswirkung auf das Fertigteil im Rahmen des Einstellbereichs der Stellgrößen der nachfolgenden Prozessschritte ausgeregelt werden kann. Damit entsteht ein Fertigteil, das den Spezifikationen entspricht (vorwärtsverkettete präventive Regelung, Bild 5).

2. Ausgliederung des Halbzeugs aus der Prozesskette, wenn die erforderliche Korrektur den zulässigen Stellbereich überschreitet und damit auch bei einer weiteren Bearbeitung das Fertigteil die Spezifikationen nicht einhalten kann. Gleichzeitig erfolgt durch eine Beeinflussung des vorgelagerten Prozessschrittes, in dem die Abweichung verursacht worden ist eine verursachergerechte Rückführung, (rückwärtsverkettete Regelung, Bild 5).

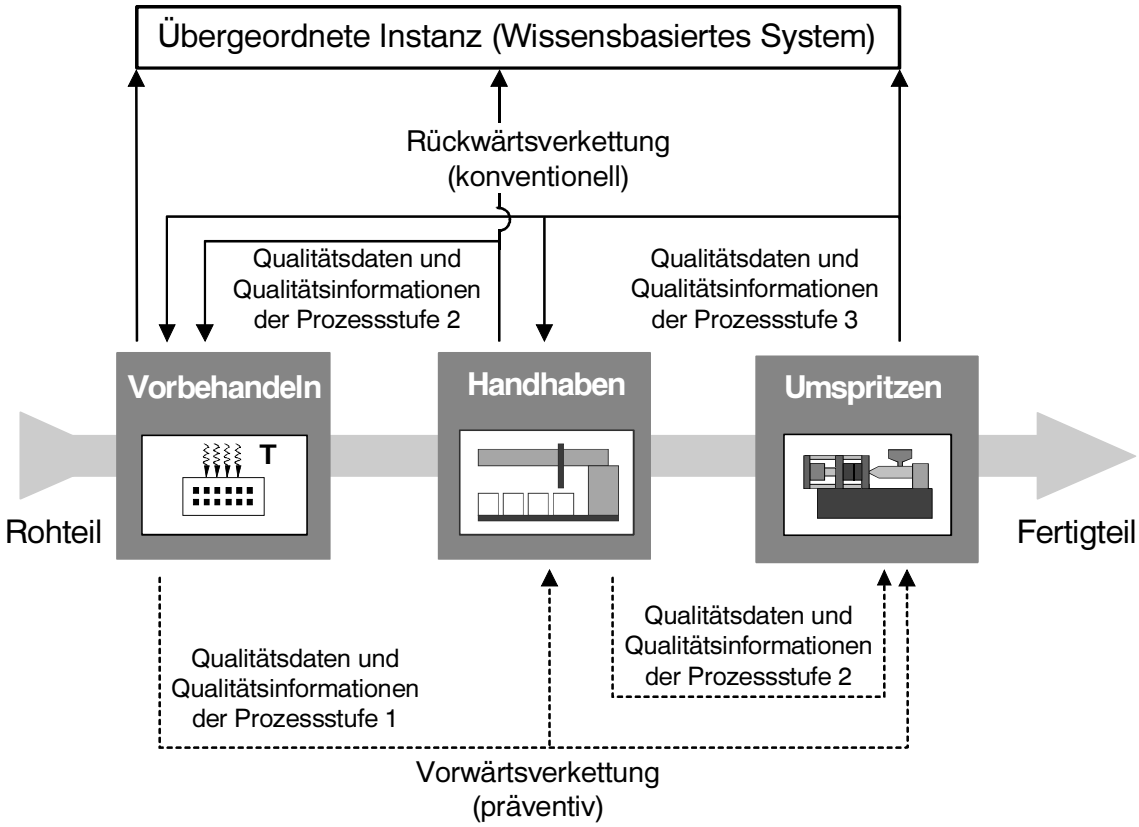

Bild 5: *Vorwärts- und rückwärtsverkettete Qualitätsregelkreise*

Das Bewerten des aktuellen Prozesszustandes mit einer ggfs. erforderlichen Korrektur einzelner Prozessparameter wird von dem Wissensbasierten System übernommen. Dieses System ist jedoch alleine nicht in der Lage, direkt mit den Prozesskettengliedern zu kommunizieren. Für das Einrichten von Qualitätsregelkreisen bei Prozessketten, die im Idealfall ohne Benutzerinteraktion arbeiten sollen, muss eine entsprechende Anbindung des regelnden Systems an die Prozesskette erfolgen. Derzeit wird an einer Lösung gearbeitet, die in der Lage ist, mit den Prozesskettengliedern Parameterwerte und Halbzeugdaten auszutauschen. Diese Informationen aus der Prozesskette werden auf Einhaltung vorgegebener Grenzwerte überprüft und im Abweichungsfall durch Hinzuziehen („Befragen“) der erarbeiteten Wissensbasis Korrekturinformationen erzeugt und an die Prozesskette zurückgemeldet.

3.3.3 Ausblick

In einem nächsten Schritt soll das regelnde System dazu befähigt werden, unter Berücksichtigung der kontinuierlichen Verbesserung seine Regelstrategien immer besser an die Prozesskette anzupassen. So sollen z. B. häufig auftretende Abweichungen in ihrer Bedeutung für die zu überwachenden Qualitätszielgrößen bewertet und an den Bediener gemeldet werden, um systematisch auftretende

Fehleinstellungen erkennen und eliminieren zu können. Parallel dazu wird die Wissensbasis mit diesen Informationen erweitert.

Die Prüfung der Übertragbarkeit der erarbeiteten Qualitätsregelkreise auf andere Prozessketten ist ein weiterer Schwerpunkt. Dies ist anhand der Prozesskette des Teilprojektes C3 „Integrierte Fertigung durch Umformen, Fügen und Trennen in einem Werkzeug“ vorgesehen.

Mit dem Teilprojekt C2 wird die Grundlage für die Optimierung sowohl der Produktqualität als auch von Qualitätsfähigkeit und Robustheit der Prozesskette geschaffen, indem z. B. in Bezug auf die Qualität des Prozesskettenergebnisses als signifikant erkannte Prozessparameter exakt überwacht und geregelt sowie die Toleranzen der als nicht signifikant erkannten Parameter geöffnet werden.

4 Zusammenfassung

Die rasche Entwicklung und Einrichtung kurzer, wirtschaftlicher Prozessketten stellt einen wichtigen Baustein zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen insbesondere an Hochtechnologiestandorten dar. Hierbei ist es wichtig, dass einerseits die durch den Einsatz komplexer Fertigungsverfahren schwierig zu beherrschenden Prozessketten von Anfang an richtig zusammengestellt und die Kenntnisse aus der Entwicklung für die spätere Serienfertigung in geeigneter Weise zur Verfügung gestellt werden. Andererseits müssen für die Serienfertigung geeignete Qualitätsregelstrategien zur Verfügung stehen, die die spezifischen Eigenheiten verkürzter Prozessketten in geeigneter Weise berücksichtigen. In diesen beiden Punkten greifen die Arbeiten der hier vorgestellten Teilprojekte.

Im Teilprojekt A3 wird an der Erstellung eines lernfähigen Werkzeugs unter Verwendung von Neuronalen Netzen gearbeitet, dass insbesondere bei der Neuentwicklung von Prozessketten Hilfestellung hinsichtlich deren Robustheit und der schnelleren Betriebspunktoptimierung leistet. Nach Serienanlauf soll dieses Werkzeug bei der Suche von optimalen Prozesseinstellungen nach einer Umrüstung z. B. auf andere Produktgeometrien durch die Übertragung von Wissen aus der Entwicklung weitere Ressourcen einsparen helfen.

Teilprojekt C1 hat die Analyse und Regelung von Prozessketten mit stochastischen Methoden zum Ziel. Hierbei werden Bayesnetze mit diskreten und kontinuierlichen Zufallsvariablen eingesetzt, um trotz der häufig nicht exakt bekannten Zusammenhänge der einzelnen Parameter einer Prozesskette eine modellbasierte Regelung zu ermöglichen. Dieser Ansatz wird, um eine dynamische Prozessregelung zu erhalten, durch Möglichkeiten zur geeigneten Repräsentation der Zeit ergänzt.

Im Teilprojekt C2 werden verkettete Qualitätsregelkreise erarbeitet, die speziell auf die Erfordernisse verkürzter Prozessketten zugeschnitten sind. Mit

diesen wird sowohl die Qualitätsfähigkeit als auch die Robustheit der gesamten Prozesskette gesteigert und damit auch die Wirtschaftlichkeit der Fertigung verbessert. Als Basis der Arbeiten dient ein Wissensbasiertes System, in dem die prozesskettenspezifischen Zusammenhänge gespeichert sind. Über zwischengeschaltete Module werden Daten und Informationen mit der Prozesskette ausgetauscht und die Wissensbasis ständig erweitert.

In den Teilprojekten werden verschiedene Methoden zur Modellierung verkürzter Prozessketten eingesetzt. Da für bestimmte Prozesse bestimmte Verfahren zur Modellierung besondere Vorzüge aufweisen, werden die in den vorgestellten Teilprojekten gewonnenen Erfahrungen in einem Kriterienkatalog zusammengeführt. Dieser Kriterienkatalog dient dem Entwickler und Bediener als Hilfestellung einerseits bei der Eingrenzung und Identifikation seines Modellierungsproblems und andererseits bei der Auswahl der geeigneten Modellierungsmethode.

5 Literatur

[1] JENSEN, F. V.: *An introduction to Bayesian networks*.
London: UCL Press, 1996

[2] JORDAN, M. I.: *Learning in Graphical Models*.
Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998

[3] MURPHY, K. P.: *Inference and Learning in Hybrid Bayesian Networks*.
http://www.cs.berkeley.edu/~murphyk/

[4] PFEIFER, T.: *Qualitätsmanagement*.
München: Carl Hanser Verlag, 1996

[5] AKAO, Y.: *Quality Function Deployment, Integrating Customer Requirements into Product Design*.
Cambridge Massachusetts, Productivity Press, 1990

[6] QS 9000 1995. *Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse*.

[7] Norm DIN 25424 1990. *Fehlerbaumanalyse*.

[8] ATLAN-TEC: *Handbuch zu NeuroModel*.
Willich: Atlan-tec KG, 1999

[9] DEVENTER, R.; NIEMANN, H.: Nonlinear modeling of a production process by hybrid Bayesian Networks. *European Conference on Artificial Intelligence (August 2000)*

[10] BACH, F. W.; DOEGE, E.; HAFERKAMP, H.; SEIDEL, H. J.; STEGEMANN, D.; WINDELBERG, D.; WOHLFART, H.: Vorbeugen statt Nacharbeit (2 Teile). Bericht zum SFB 326 'Prozessintegrierte Qualitätsprüfung für metallische Bauteile des Maschinenbaus' der DFG. In: *Qualität und Zuverlässigkeit QZ* 40 (1995) 4, S. 426-430, QZ 40 (1995) 5

[11] FIEDLER, U.: *Expertensysteme in der technischen Diagnostik*. Berlin: Technik-Verlag, 1990